

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ
ТА ОПОРІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ФРАГМЕНТІВ
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ THERM 7.8**

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
для здобувачів першого рівня (бакалаврського) вищої освіти
спеціальностей 144 «Теплоенергетика» освітньої програми
«Енергетичний менеджмент. Енергоефективні муніципальні та промислові
технології» та 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Теплогазопостачання і вентиляція»

Київ 2024

УДК 621.311

Д70

Укладачі: О. Г. Погосов, канд. техн. наук;
Ю. М. Кольчик, канд. техн. наук, доцент;
П. О. Пасічник, канд. техн. наук;
К. О. Габа, канд.техн.наук;
Б. І. Козячина, аспірант

Рецензент Чепурна Н.В., канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск М.А. Кириченко, канд. техн. наук,
доцент, завідувач кафедри теплотехніки

*Затверджено на засіданні кафедри теплотехніки, протокол
№ 6 від 15 листопада 2023 року.*

В авторській редакції.

Дослідження лінійних теплопровідних включень та опорів
Д70 теплопередачі фрагментів огорожувальних конструкцій із
застосуванням програмного комплексу therm 7.8: методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи / уклад.: Погосов О.Г. та ін. – Київ:
КНУБА, 2024. – 20 с.

Містять зміст, порядок оформлення і вказівки до виконання
лабораторної роботи

Призначено для здобувачів першого рівня (бакалаврського)
вищої освіти спеціальностей 144 «Теплоенергетика» освітньої
програми «Енергетичний менеджмент. Енергоефективні
муніципальні та промислові технології» та 192 «Будівництво та
цивільна інженерія» освітньої програми «Теплогазопостачання і
вентиляція».

© КНУБА, 2024

Зміст

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	4
1. ВИХІДНІ ДАНІ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	4
2. ПОПЕРЕДНІ НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....	6
3. ПОБУДОВА ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВУЗЛІВ	7
4. ПОБУДОВА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ВУЗЛА.....	10
5. ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОГО ОПОРУ	
6. ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ФРАГМЕНТУ ТА ЙОГО ЧАСТИН.....	15
ВИСНОВКИ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ	18
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	19

Загальні положення

Лабораторна база: персональний комп'ютер (індивідуальний), програмний комплекс THERM Finite Element Simulator 7.8.

Актуальність роботи: визначення приведенного опору теплопередачі базується на коректному визначенні лінійних та точкових коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень («містків холоду»), що в свою чергу, на відміну від впливу опору однорідного поля, дозволяє достовірно визначати навантаження, споживання та відповідність умовам комфорту. Актуальність моделювання теплопровідних включень та визначення їх реального опору також пов'язана з низькою доцільністю забезпечення нормативних значень опору теплопередачі виключно підвищенням товщини теплової ізоляції [1], [2] та зростаючим трендом екологічної сталості.

Мета лабораторної роботи: здобути навички моделювання точкових та лінійних теплопровідних включень, визначати опори теплопередачі однорідних та неоднорідних фрагментів огорожувальних конструкцій.

Результатом виконання лабораторної роботи є сформований файл розширення *.TНМ та/або роздруківка результатів розрахунків моделі. Перевірка викладачем роботи здійснюється на персональному комп'ютері шляхом перевірки досліджуваного вузла на коректність геометричної побудови, теплотехнічних показників матеріалів, граничних умов тощо.

1. Вихідні дані до виконання роботи

Модель вузла, який буде досліджуватися, обирається відповідно до табл. 1.1 цих методичних рекомендацій та базується на фрагментах, наведених в Додатку Г ДСТУ 9191:2022 [3].

Інструкції та рекомендації щодо застосування програмного комплексу, які не ввійшли до цих методичних рекомендацій, доступні на офіційному сайті розробника системи автоматизованого проектування (САПР) у розділі сайту Документація [4].

Вихідні дані

№ пор.	Порядковий номер студента у групі	Тип вузла (додаток Г [3])	Матеріал несучої конструкції (додаток А Таблиця А.1 [3])	Матеріал теплоізоляційного шару (додаток А Таблиця А.1 [3])
1	1, 5, 9, 13...	Вузол примикання зовнішніх стін із цегли з опорядженням штукатуркою до міжповерхового перекриття	39 (1000 кг/м ³)	1 (125 кг/м ³)
2	2, 6, 10, 14...	Вузол кутового сполучення зовнішніх стін із залізобетону та цегли з опорядженням штукатуркою	58 (1400 кг/м ³)	4 (35 кг/м ³)
3	3, 7, 11, 15...	Вузол улаштування пластикового дюбеля з металевим стрижнем для кріплення теплоізоляційного шару в фасадній системі	76 (1600 кг/м ³)	1 (150 кг/м ³)
4	4, 8, 12, 16...	Вузол примикання зовнішніх стін із цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття	79 (1500 кг/м ³)	3 (35 кг/м ³)

2. Попередні налаштування системи автоматизованого проектування

Для зручності подальшої роботи в САПР рекомендується здійснити наступні налаштування: в меню View увімкнути позицію Crosshair та Grid, що дозволить отримати перехрестя курсору з прив'язкою до кутів майбутньої моделі та розміточну сітку відповідно (рис. 2.1).

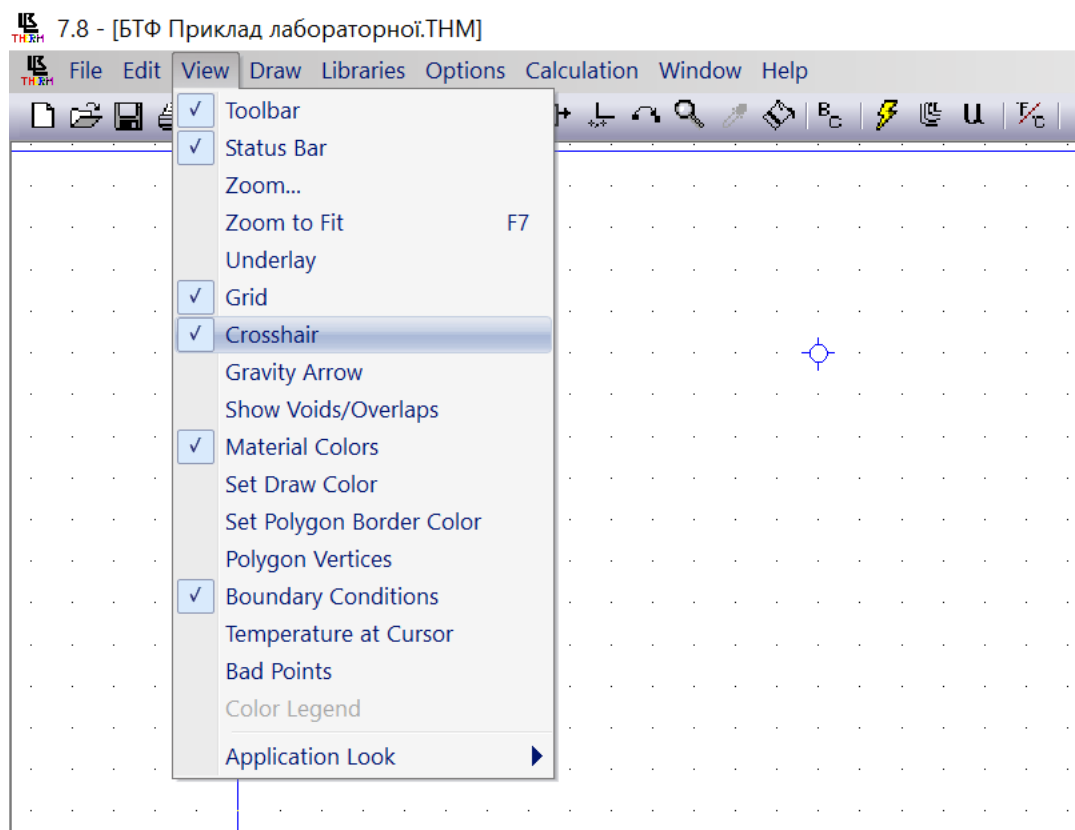


Рис. 2.1. Попередні налаштування САПР (фрагмент робочого поля)

В цій лабораторній роботі розглядаються виключно стаціонарні процеси теплопередачі, відповідно не враховуються додаткові динамічні джерела теплової енергії та системи затінення прозорих та непрозорих будівельних конструкцій.

Для моделювання систем затінення рекомендується використовувати систему автоматизованого проектування WINDOW 7 [5].

Варто зазначити, що вбудований інтерфейс графічної побудови в THERM є досить вузьким, в першу чергу через призначення САПР. Для побудови складних геометричних моделей вузлів конструкцій можна

використати функцію імпорту формату DXF. В рамках цих методичних рекомендацій будуть застосовуватися вбудований графічний редактор САПР.

3. Побудова геометричних моделей вузлів

Система автоматизованого проектування (САПР) Therm 7.8.74 (поточна версія станом на листопад 2023 року) призначена в першу чергу для моделювання явищ теплопередачі, зокрема в будівельних конструкціях.

Побудова графічних елементів моделі відбувається в такій послідовності:

3.1. Вибирається інструмент, наприклад «Draw Rectangle» (інструмент розміщений на консолі швидкого доступу).

3.2. Обирається початкова точка моделі в довільному порядку шляхом натискання лівої клавіші миші.

3.3. Без переміщення курсору по робочому полю вводимо з цифрової клавіатури розміри прямокутника через підтвердження за допомогою клавіші Enter та вибором напрямку побудови цифровими стрілками (рис. 3.1).

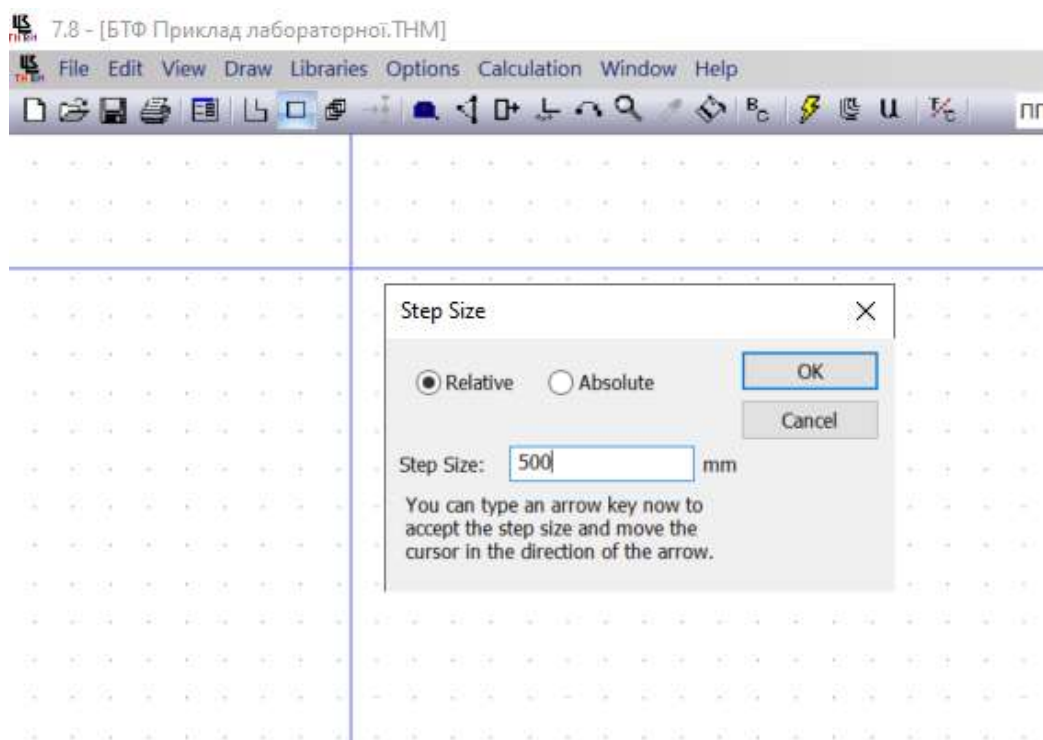


Рис. 3.1. Введення геометричних розмірів моделі з цифрової клавіатури

3.4. Для масштабування отриманого зображення в даному САПР використовуються комбінації Ctrl+Права клавіша миші (виведення всього вмісту на екран), Shift+Права клавіша миші (поступове зменшення масштабу) та Права клавіша миші (поступове збільшення масштабу).

3.5. Послідовно (по алгоритму п. 3.1-3.4) набирається досліджувана модель (приклад такого виконання наведено на рис. 3.2).

3.6. Для переміщення моделі по робочому полю використовується команда Move Polygon в консолі швидкого доступу. Вибір декількох прямокутників здійснюється стандартно – послідовним натисканням лівої клавіші миші з утриманням клавіші Ctrl.

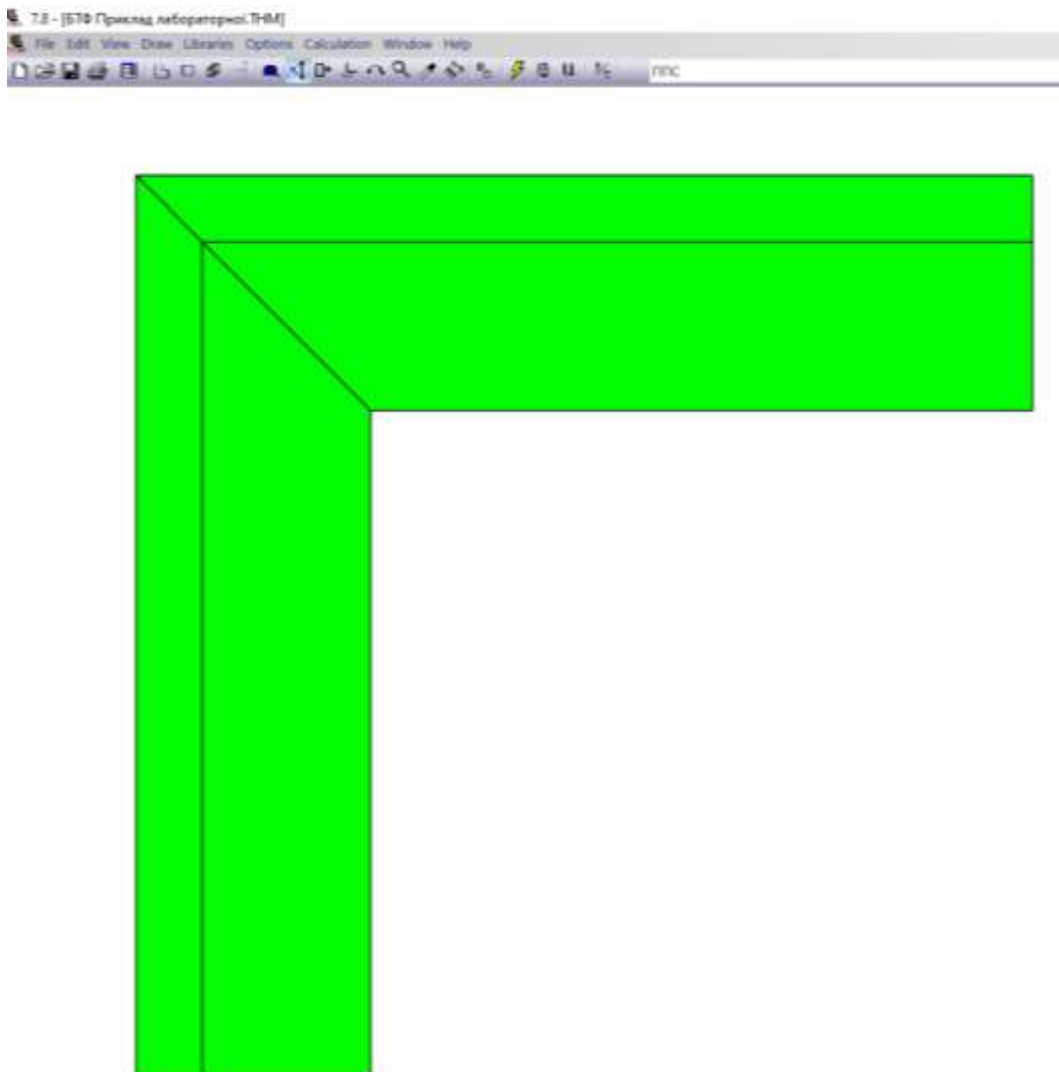


Рис. 3.2. Результат оптимальної побудови геометричної моделі досліджуваного вузла (приклад для кутового сполучення стін)

При побудові моделі рекомендується виконувати періодичну перевірку геометричної моделі на предмет утворення пустот, правильності збіжності вершин фігур та паралельності ліній фігур, що будуються для формування геометричної моделі вузла.

Також варто зазначити, що при геометричній побудові моделі потрібно уникати утворення замкнутих пустот. Якщо утворення пустоти викликано геометричною формою досліджуваного перерізу, необхідно застосовувати вбудований інструмент заповнення Fill (Fill void with specified material). При цьому матеріалом заповнення обирати необхідно як правило повітря, у випадках заповнення простору між шарами скла в склопакеті – відповідний газ: аргон, ксенон, криптон та інші [6], [7].

Звертаємо увагу, що при побудові моделі варто керуватися принципами зменшення кількості вершин моделі, що спрощує розрахунок вбудованими методами САПР (оптимальна геометрична модель наведена на рис. 3, неоптимальна – на рис. 3.3).

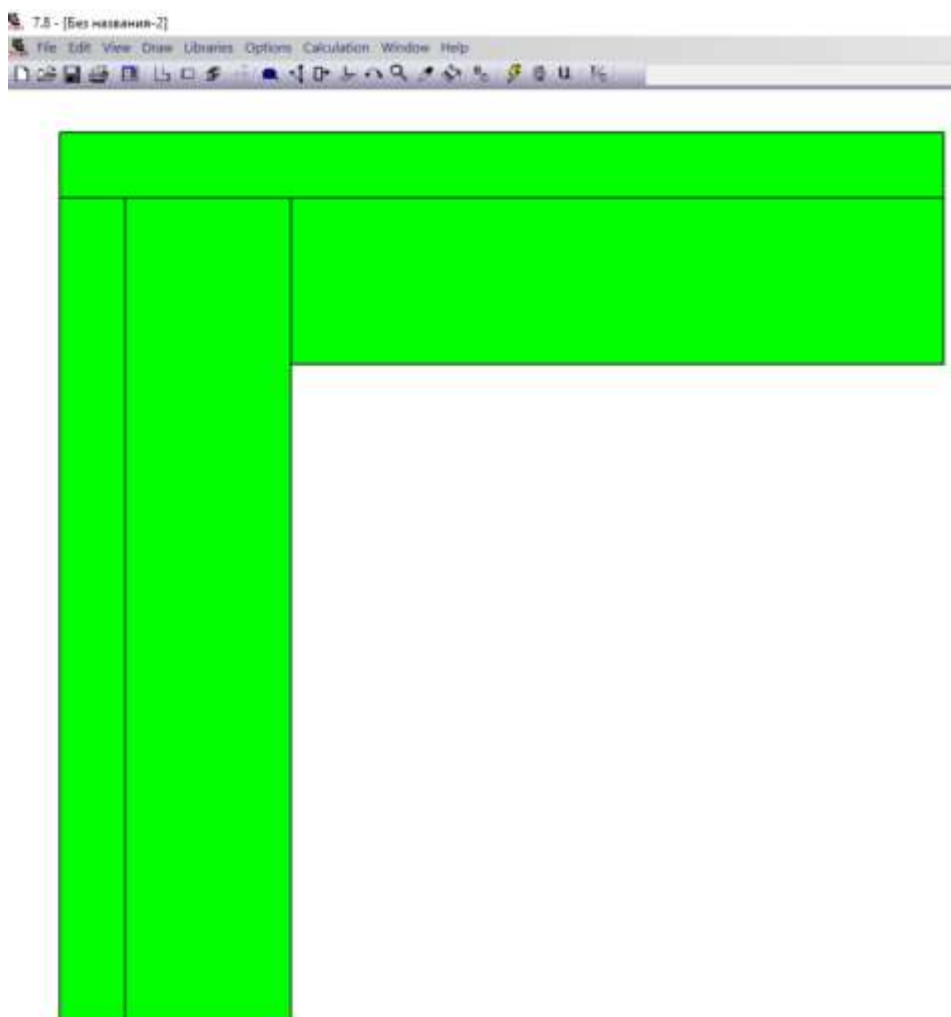


Рис. 3.3. Результат неоптимальної побудови геометричної моделі досліджуваного вузла (приклад для кутового сполучення стін)

Особливо актуально питання оптимізації кількості вершин геометричної моделі постає при дослідженні моделей складної конфігурації, наприклад примикання віконних блоків в зонах рядового сполучення, перемичок чи підвіконня, а також при дослідженнях інших вузлів, які складаються з багатьох елементів простішої конфігурації.

4. Побудова фізичної моделі досліджуваного вузла

В САПР передбачено дві базові складові для побудови фізичної моделі на основі геометричної: призначення характеристик матеріалів шарів вузла та призначення стану меж моделі (термодинамічні граничні умови).

4.1. В меню Libraries обираємо пункт Material Library, в якому створюємо необхідний нам матеріал відповідно до вихідних даних лабораторної роботи. Створення відбувається шляхом натискання пункту New, задання ім'я матеріалу та наступним внесення відповідних теплофізичних властивостей (теплопровідності та ступеню чорноти тіла). Теплопровідність обирається відповідно до таблиці А.1 Додатку А ДСТУ 9191:2022 [3]. Склад меню наведено на рис. 4.1

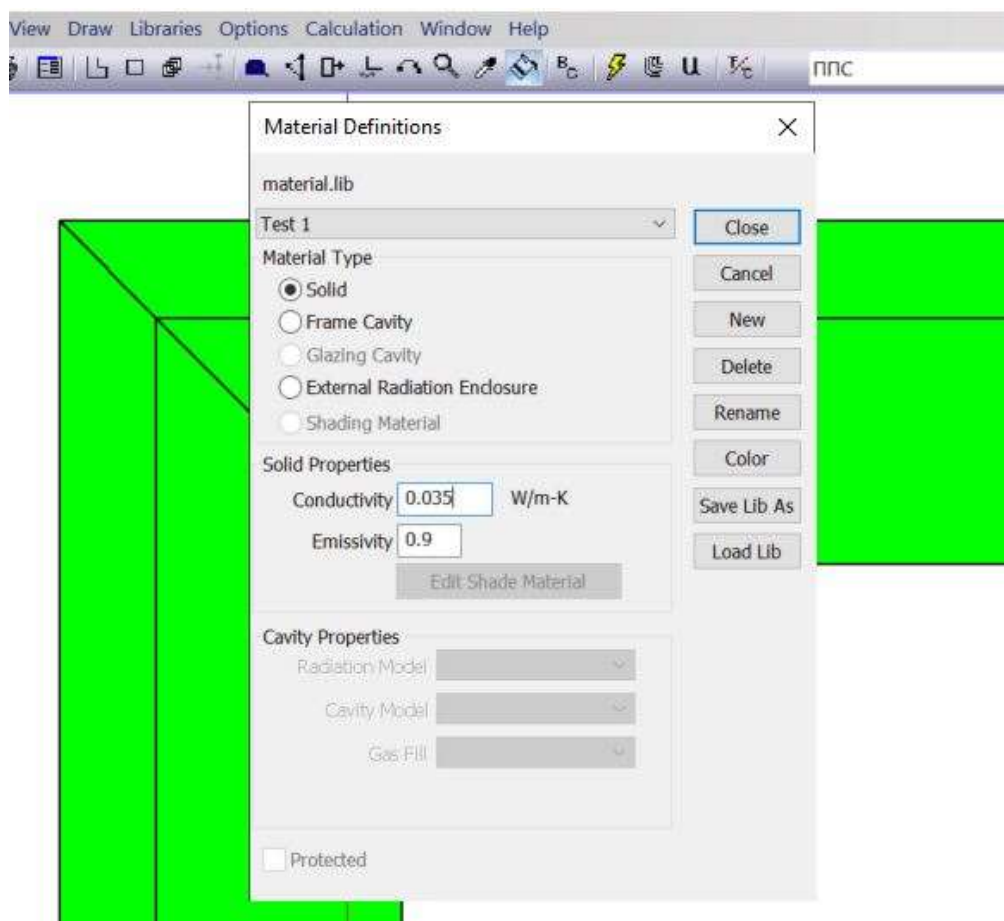


Рис. 4.1. Меню Material Library

4.2. В меню Libraries обираємо підпункт Boundary Conditions Library. Створення характерних меж моделі (граничні умови, які характеризують стан об'єкту на межах моделі в розрахункових параметрах) відбувається шляхом натискання пункту New, задання ім'я стану межі та наступним внесення відповідних теплофізичних властивостей (температури та коефіцієнту тепловіддачі). Внутрішню температуру доцільно обирати на підставі відповідних типу будівлі державних будівельних норм та правил (наприклад група ДБН Громадські будівлі і споруди) та/або ДБН В.2.5-67:2013 [8], ДСТУ Б EN 15251:2011 [9], зовнішню температуру – згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [10], коефіцієнт тепловіддачі – згідно з табл. Б ДСТУ 9191:2022 [3]. Склад меню наведено на рис. 4.2.

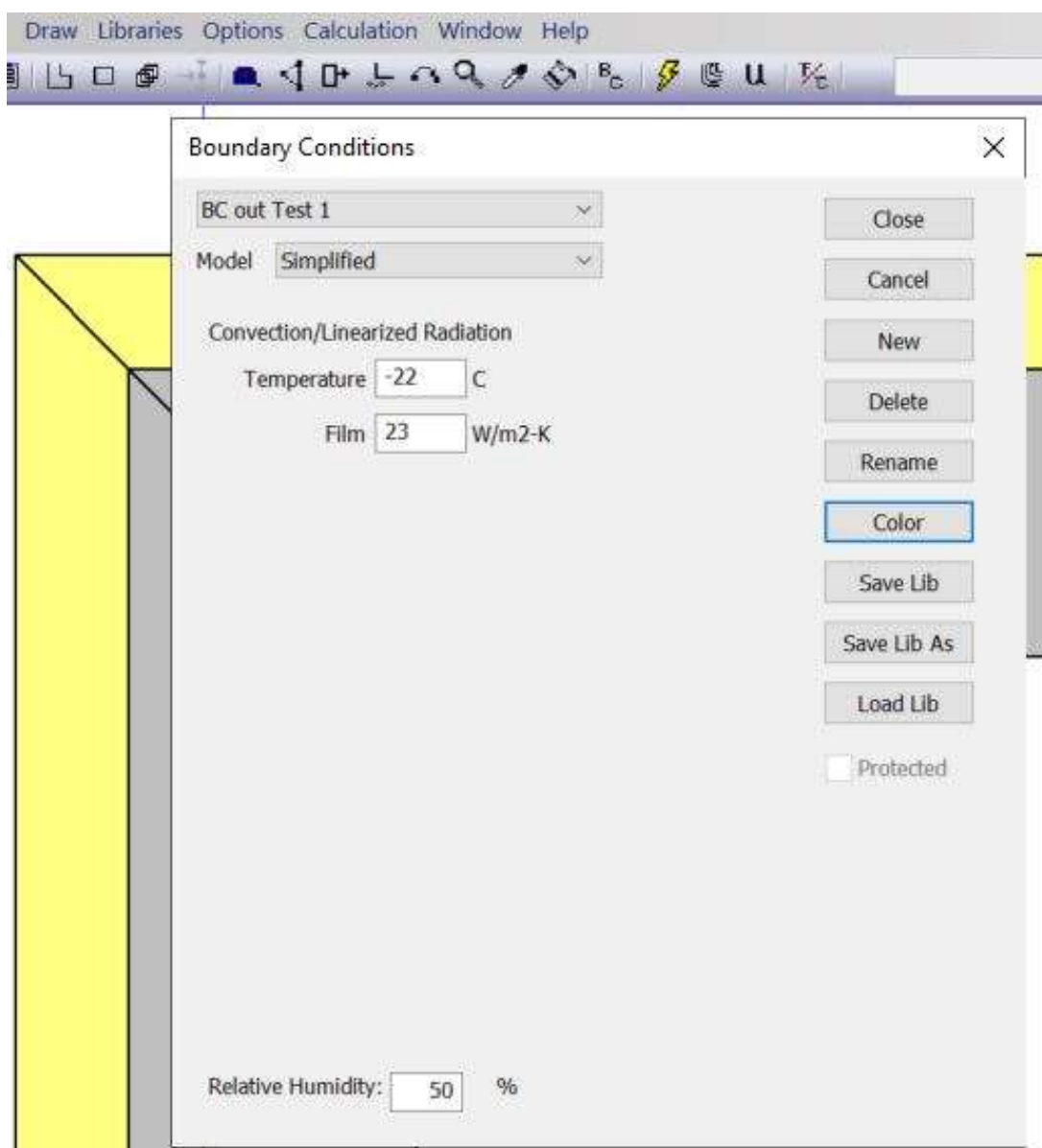


Рис. 4.2. Меню Boundary Condition Library

4.3. Після внесення даних в дві бібліотеки (які будуть збережені для подальшої роботи в інших моделях) проводимо присвоєння матеріалів та меж шляхом вибору в випадаючому меню консолі швидкого доступу. Зверніть увагу, що після вибору матеріалів, необхідно натиснути клавішу BC (Draw Boundary Conditions) для доступу щодо присвоєння стану меж. Результат виконання повинен відповідати прикладу на рис. 4.3.

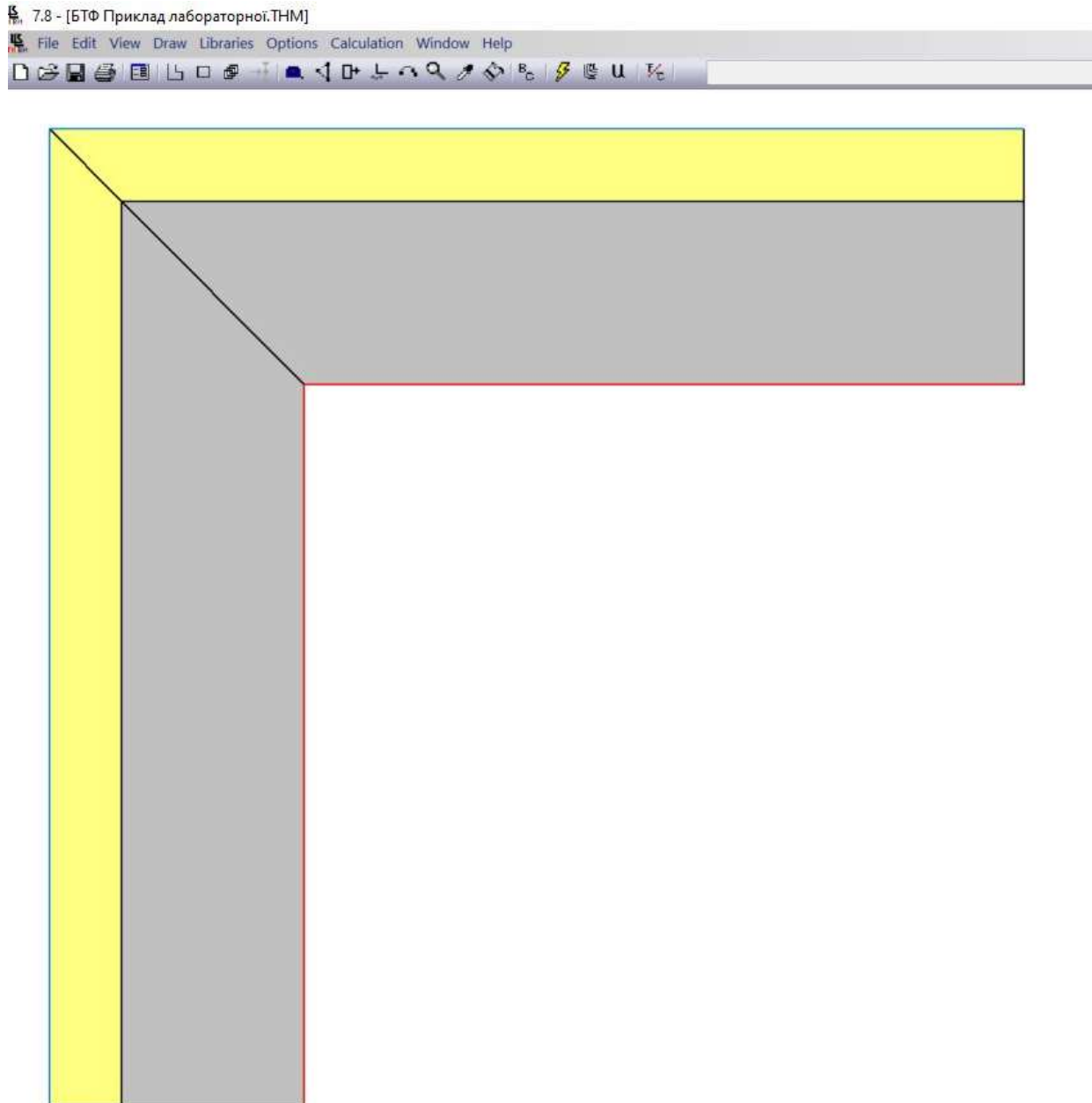


Рис. 4.3. Приклад результату присвоєння матеріалів та стану меж

4.4. Для побудови ізотерм моделі необхідно натиснути клавішу Calc та підтвердити розрахунок на даному етапі без зазначених U-факторів. Результат побудови ізотерм наведено на рис. 4.4.

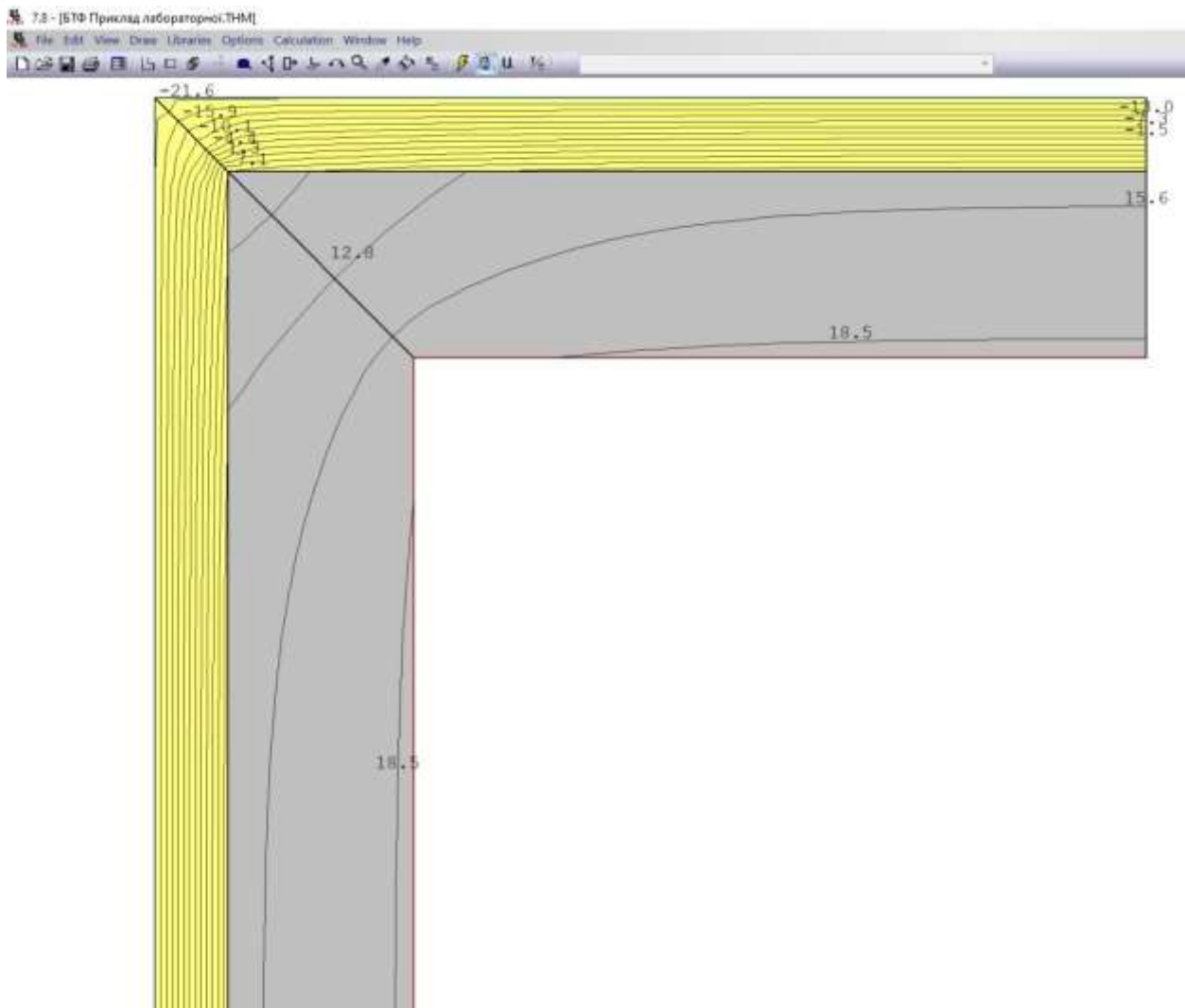


Рис. 4.4. Приклад результату побудови ізотерм досліджуваної моделі

Варто звернути увагу, що для коректної роботи та проведення розрахунків на THERM Finite Element Simulator 7.8 необхідно оновити бібліотеку Microsoft Visual C++ Redistributable packages for Visual Studio 2022 [11].

THERM Finite Element Simulator 7.8 дозволяє виконати побудову ізотерм моделі в режимі кольорової градації розподілення температурних зон (рис. 4.5). Для налаштування вигляду виведення результатів розрахунків необхідно зайти в меню Calculation – Display Option. Серед можливих варіантів особливо актуальними для подальшого аналізу є Color Infrared (в цьому пункті опціонально можна зменшувати роздільну здатність побудови, що значно впливає на швидкість побудови ізотермічного поля) та Show Min/Max temperatures. Також варто додати, що САПР дозволяє виконувати візуальну побудову якісних рівнів теплових потоків (для цього в Calculation – Display Option потрібно обрати режим Color flux magnitude).

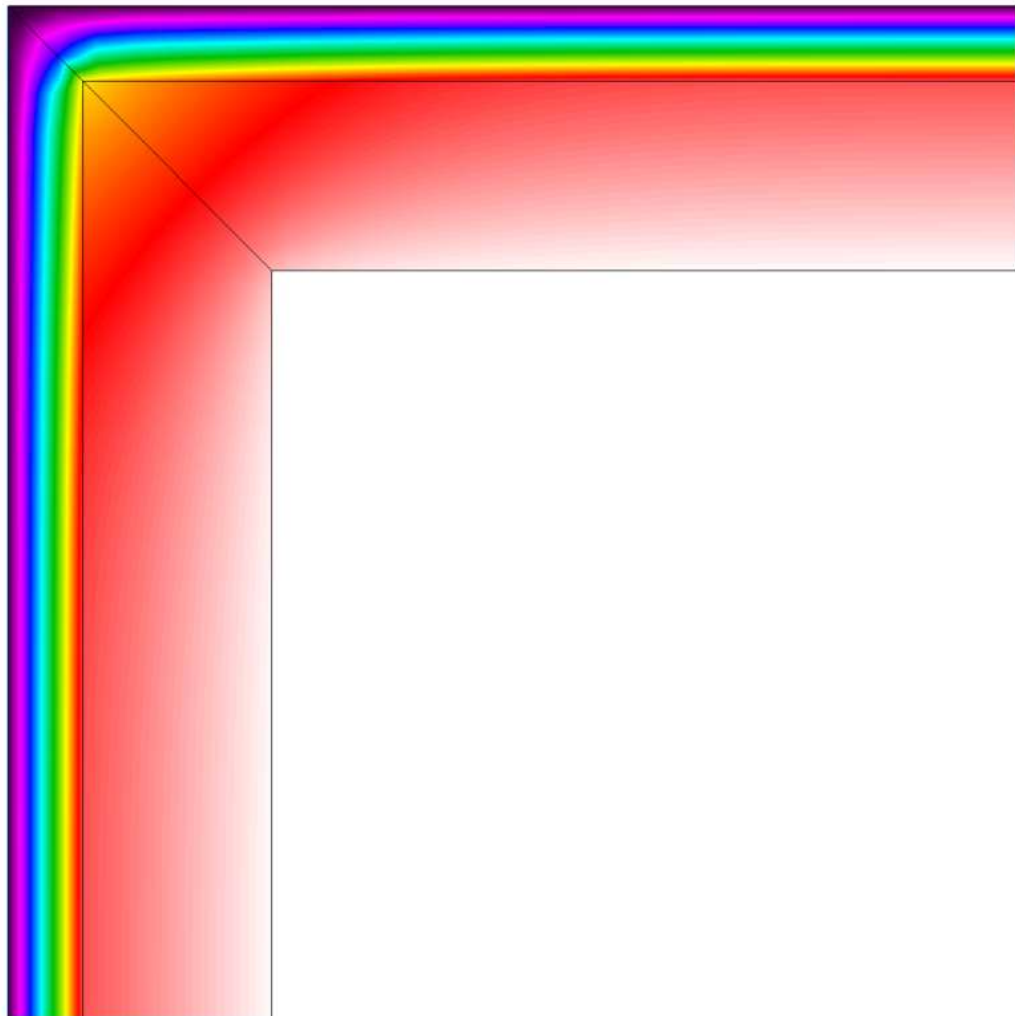


Рис. 4.5. Приклад результату побудови температурного поля моделі

На рис. 4.6 в якості прикладу подано характерний приклад утворення містка холоду для випадку бетонної колони, яку взято в металевий бандаж з конструктивних міркувань в режимі побудови лінійних ізотерм та кольорової градації (для збільшення візуального ефекту шару теплової ізоляції в даній моделі немає).

Побудова ізотерм в досліджуваних фрагментах дозволяє оцінювати ризику утворення конденсату на поверхнях та приймати рішення щодо методів та засобів боротьби з ними. Оцінка потенціалу утворення конденсату може здійснюватися як програмними методами САПР, так і аналітичними інструментами, наприклад оцінкою температури мокрого термометру (на підставі вологості повітря середовища) за допомогою Іd-діаграми.

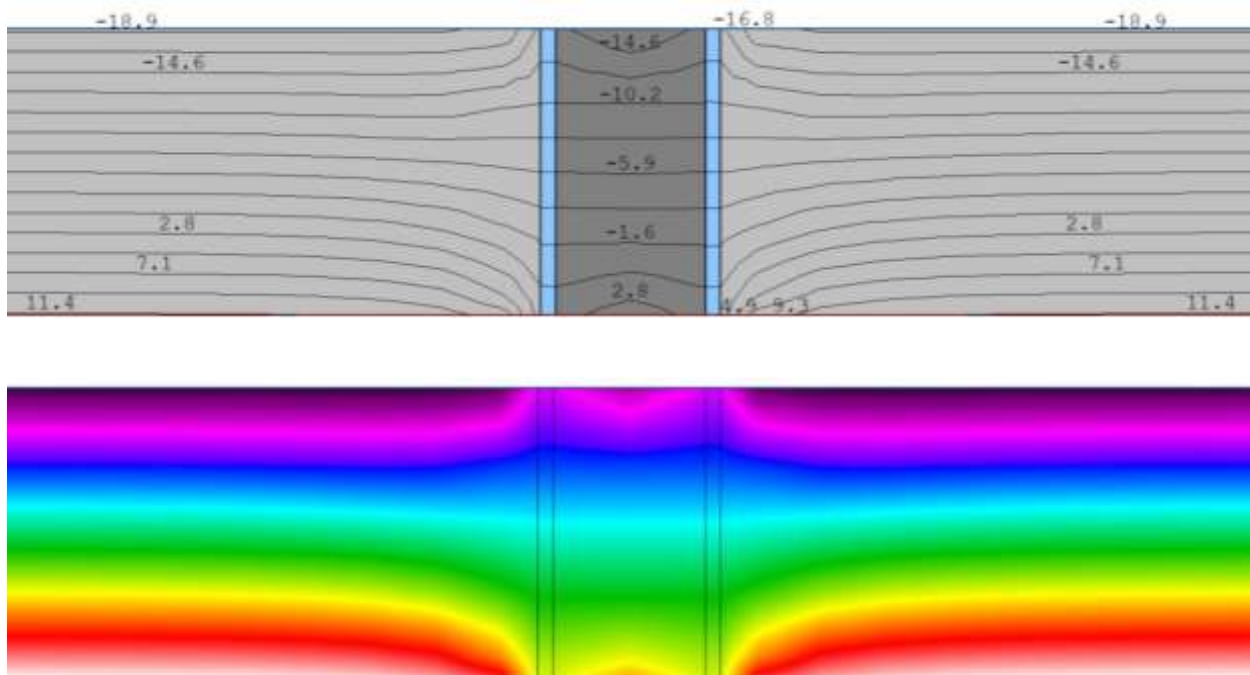


Рис. 4.6. Характерний приклад візуалізації містків холоду

5. Визначення значення приведенного опору теплопередачі досліджуваного фрагменту та його частин

5.1. Переходимо до моделювання фрагментів досліджуваного вузла на предмет значень термічного опору (коефіцієнту теплопередачі). Виходимо з режиму моделювання, натиснувши на клавішу BC (Draw Boundary Conditions).

5.2. Обираємо межову лінію моделі, для якої необхідно розрахувати опір теплопередачі. Для цього обираємо фрагмент моделі (в прикладі прямокутник тіла утеплювача) та натискаємо на кнопку Insert Point в консолі швидкого доступу.

5.3. В меню Library обираємо пункт підменю Set Boundary Conditions. Створюємо новий тип виділеної поверхні та задаємо йому довільну зручну назву та тип його характеристики межі (рис. 5.1). Відповідним чином формуємо одну U-Factor Surface для подальшого дослідження.

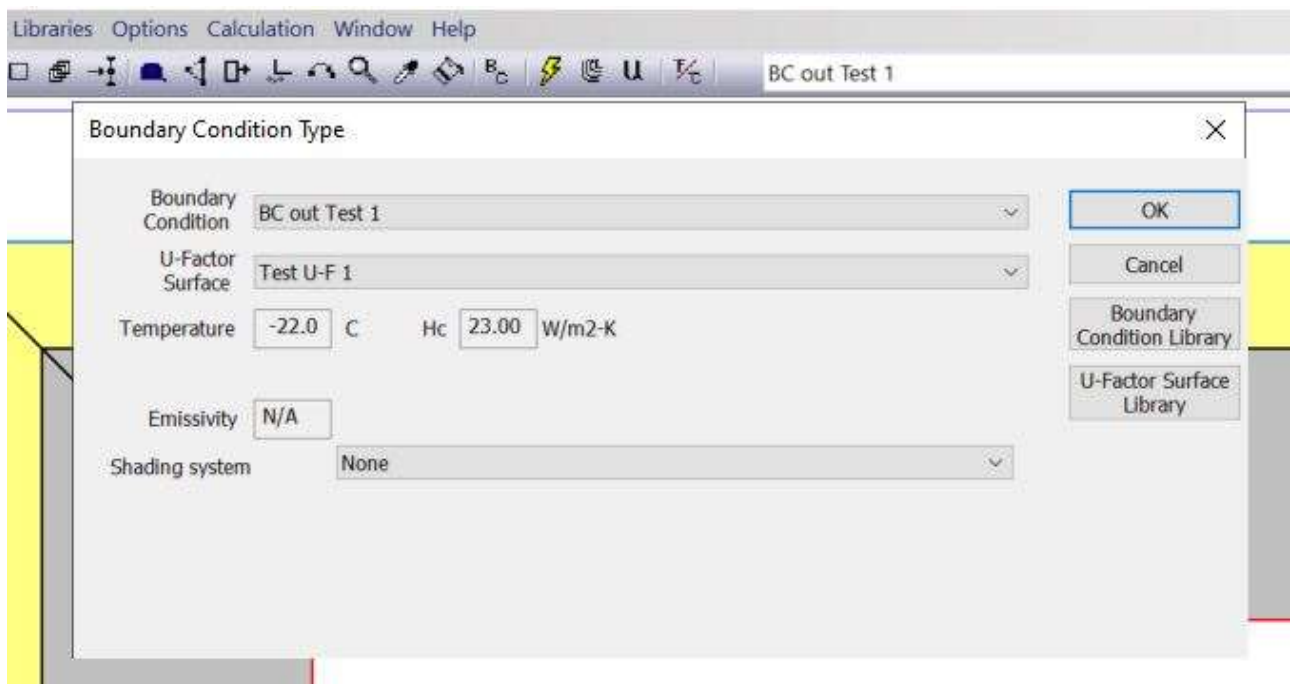


Рис. 5.1. Створення виділеної поверхні

5.4. Перераховуємо результати внесення нових вихідних факторів шляхом натискання клавіші Calc. Далі натисканням кнопки “U” (Show U-Factors) отримаємо результати опорів та теплових потоків моделі (результат наведено на рис. 5.2).

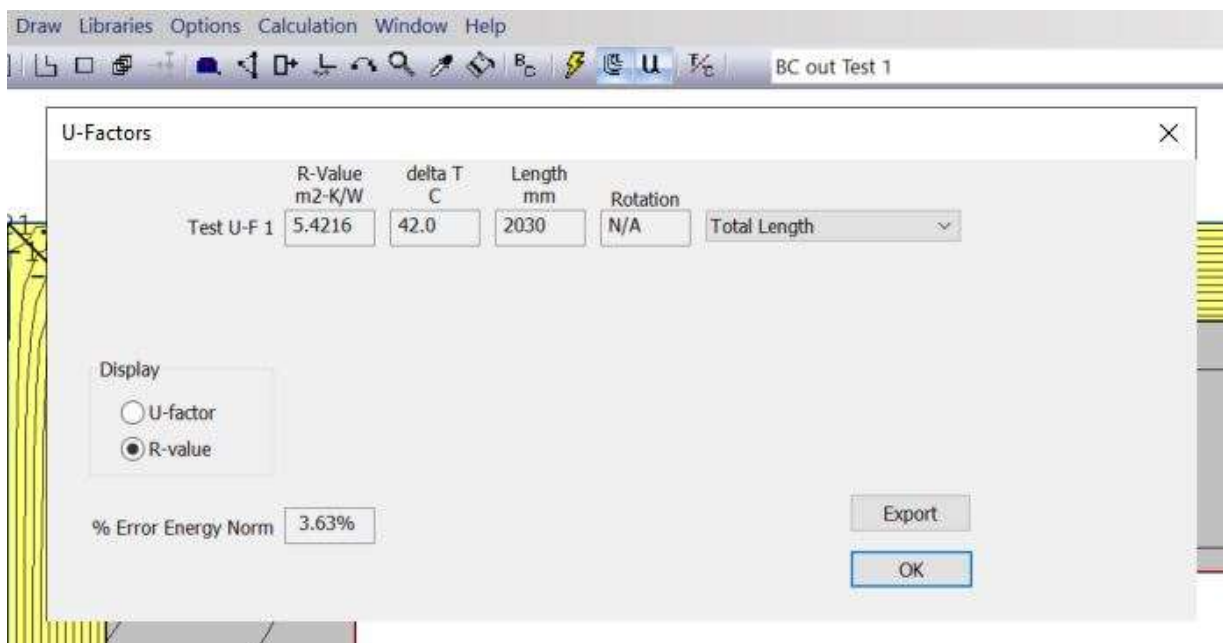


Рис. 5.2. Результати моделювання досліджуваного вузла в розрізі отримання приведенного опору теплопередачі

5.5. Для дослідження кількісних показників (по аналогії з наведеними в Додатку Г ДСТУ 9191:2022 [3]) можливо створити виділені фрагменти та відповідні їм нові U-Factor Surface. Після чого нові U-Factor Surface з'являться в переліку U-Factors та чисельно будуть доступні для аналізу.

На прикладі вузла з рис. 4.6 приводимо приклад дослідження кількісного значення лінійного теплопровідного включення. Аналізуючи побудовані САПР ізотерми визначаємо точку утворення однорідного поля та, використовуючи інструмент Insert points на консолі керування, розділяємо межу лінію (межа по зовнішньому повітрю) на декілька частин. При цьому при додаванні проміжних точок зникають граничні умови, відповідно їх потрібно присвоїти ділянкам повторно.

Після поділу межевої лінії на фрагменти, потрібно виконати кроки 5.3 та 5.4 вже для двох досліджуваних ділянок (умовна однорідна частина та теплопровідне включення).

	U-factor W/m2-K	delta T C	Length mm	Rotation	
Test U-F 2	2.9648	42.0	512.257	N/A	Total Length
Test U-F 1	1.5496	42.0	859.369	N/A	Total Length

Display

U-factor
 R-value

% Error Energy Norm 7.37%

Export
OK

Рис. 5.3. Результати дослідження двох фрагментів огорожувальної конструкції (однорідного поля та включення)

Значення Length у випадку з довільним внесенням розділової точки можна враховувати з точністю до одиниць. Таким чином для заданого фрагменту Test U-F 2 (частина лінійного теплопровідного включення) коефіцієнт теплопередачі складає 2,96 Вт/м²К при довжині ділянки впливу 512 мм (рис.5.3). Таким чином значення ψ_m (відповідно до позначення з ДСТУ 9191:2022) складатиме:

$$\psi_m = UFactor \times l, \quad (1)$$

де $UFactor$ – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²К;

l – лінійних розмір ділянки, м.

Таким чином, ψ_m складатиме 1,52 Вт/мК для ділянки з лінійним розміром 512 мм.

Висновки з лабораторної роботи

1. Заходи з термомодернізації в частині оболонки будівлі не повинні виключно опиратися на збільшення товщини теплоізоляційного шару. Мінімізація лінійних та точкових теплопровідних включень («містків холоду») може дозволити збільшити приведений опір теплопередачі без зміни товщини огорожувальної конструкції.

2. Огороджувальну конструкцію необхідно розраховувати на предмет тепловтрат, використовуючи виключно приведений опір теплопередачі конструкції.

2. Термічний опір однорідної частини поверхні очевидно завжди вищий, ніж приведений і не може характеризувати оболонку будівлі комплексно.

3. Кількісне значення коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень суттєво впливає на приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції. В ДСТУ 9191:2022 наведені значення коефіцієнтів теплопередачі характерних типових лінійних та точкових теплопровідних включень. При необхідності (наприклад при відсутності необхідного вузла) такі значення можна знаходити, проводячи моделювання в САПР, зокрема в комплексі THERM Finite Element Simulator 7.8.

4. В інженерних розрахунках, в тому числі в розділі проектної документації Енергоефективність, при застосуванні кількісних показників теплопровідних включень, як змодельованих в САПР, так і прийнятих з ДСТУ 9191:2022, необхідно враховувати геометричний розмір ділянки впливу включення та відповідно до цього розміру правильно розраховувати і площу однорідної частини огорожувальної конструкції.

Список використаних джерел

1. *Dynamic analysis of the heat theft issue for residential buildings* / F. Calise [et al.] // *Energy and Buildings* – 2023. – No. 282. – 112790.
2. *An integrated computational method for calculating dynamic thermal bridges of building facades in tropical countries* / M.F. Alkadri [et al.] // *Frontiers of Architectural Research*. – 2023.
3. *Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель: ДСТУ 9191:2022. – На заміну ДСТУ Б В.2.6-189:2013. – [Чинний від 2023-03-01].*
4. *THERM documentation energy technologies area [Electronic resource]* / Home | Windows & Daylighting. – Mode of access: <https://windows.lbl.gov/documentation-therm>. – Title from screen.
5. *Documentation | THERM | windows & daylighting [Electronic resource]* / Home | Windows & Daylighting. – Mode of access: <https://windows.lbl.gov/documentation-therm>. – Title from screen.
6. *Heat transfer model for energy-active windows – An evaluation of efficient reuse of waste heat in buildings* / Behrouz Nourozi [et al.] // *Renewable energy*. – 2020. – No. 162. – P. 2318–2329.
7. *Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving* / K. Alhagla, A. Mansour, R. Elbassuoni // *Alexandria engineering journal*. – 2019. – Vol. 58, no. 1. – P. 283–290.
8. *Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. – На заміну СНиП 2.04.05-91 Опалення, вентиляція и кондиціонування. Крім розділу 5 та додатка 22. [Чинний від 2014-01-01].*
9. *Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT): ДСТУ Б EN 15251:2011. – [Чинний від 2013-07-01].*
10. *Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблиці 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 2011-11-01].*
11. *Latest supported Visual C++ Redistributable downloads [Electronic resource]* / Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. – Mode of access: <https://learn.microsoft.com/en-US/cpp/windows/latest-supported-vc-redis?view=msvc-170>. – Title from screen.

Навчально-методичне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ
ТА ОПОРІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ФРАГМЕНТІВ
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ THERM 7.8**

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
для здобувачів першого рівня (бакалаврського) вищої освіти
спеціальностей 144 «Теплоенергетика» освітньої програми
«Енергетичний менеджмент. Енергоефективні муніципальні та промислові
технології» та 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Теплогазопостачання і вентиляція»

Укладачі: **Погосов** Олександр Григорович,
Кольчик Юлія Миколаївна,
Пасічник Павло Олександрович,
та ін.

Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Підписано до друку 17.06. 2024. Формат 60 × 84 ^{1/16}.

Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.

Вид. № 25/IV-24. Зам. № 31/1-24

Видавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Пр-т Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002